

Klima, Klimawandel

Stock, Manfred

Veröffentlichungsversion / Published Version

Sammelwerksbeitrag / collection article

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit / provided in cooperation with:

Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL)

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Stock, M. (2018). Klima, Klimawandel. In *Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung* (S. 1077-1098). Hannover: Verlag der ARL. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0156-55991016>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY-ND Lizenz (Namensnennung-Keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/deed.de>

Terms of use:

This document is made available under a CC BY-ND Licence (Attribution-NoDerivatives). For more Information see:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0>

Manfred Stock

Klima, Klimawandel

S. 1077 bis 1098

URN: urn:nbn:de:0156-55991016



CC-Lizenz: BY-ND 3.0 Deutschland

In:

ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.):
Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung

Hannover 2018

ISBN 978-3-88838-559-9 (PDF-Version)

Klima, Klimawandel

Gliederung

- 1 Das Klima der Erde
- 2 Das Klima als veränderliches System
- 3 Der derzeitige Klimawandel
- 4 Handlungsoptionen zum Umgang mit dem Klimawandel

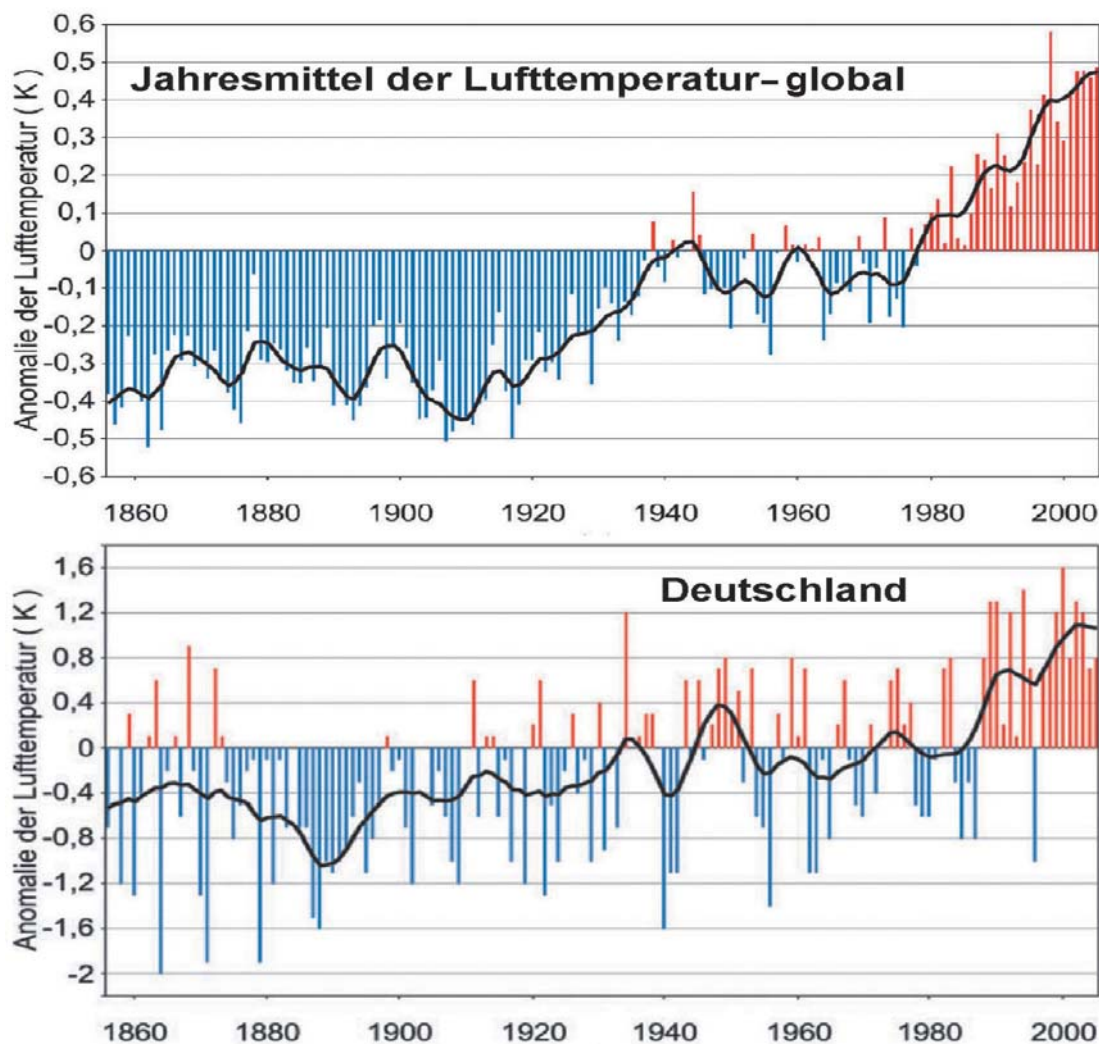
Literatur

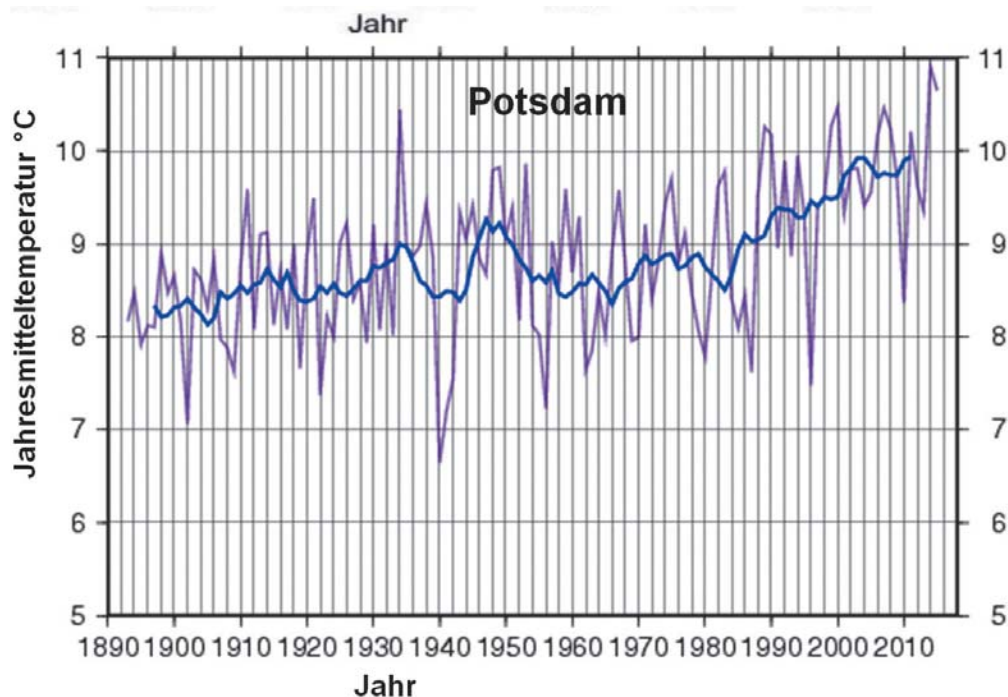
Das globale Klima befindet sich gegenwärtig in einem Wandel, der wesentlich von anthropogenen Treibhausgasen angetrieben wird. Beim Klima spielen außerdem viele weitere Faktoren eine Rolle, beginnend mit der Strahlung der Sonne. Das Klima der zurückliegenden Eiszeiten war durch eine hohe Variabilität gekennzeichnet, dagegen war es in den letzten 10.000 Jahren relativ stabil. Wie sich das Klima zukünftig entwickeln könnte, wird mit verschiedenen Szenarien und Klimamodellen ermittelt.

1 Das Klima der Erde

Das globale Klima bestimmt die Lebensbedingungen auf der Erde, die je nach geographischer Lage recht unterschiedlich sein können und durch ihre jeweiligen Klimaparameter charakterisiert sind. Das, was Menschen in ihrem Lebensbereich als Klima erleben, sind die tages- und jahreszeitlichen Ausprägungen in Form der durch das Klima bestimmten Witterungserscheinungen in ihrer *Region*, *Stadt* oder *Landschaft*. Dieses jeweilige Meso- und Mikroklima unterscheidet sich vom globalen bzw. großräumigen Makroklima, wie die Abbildung 1 für die Temperatur zeigt.

Abbildung 1 : Entwicklung der globalen Jahresmitteltemperatur (oben) und im Vergleich dazu in Deutschland (Mitte) im Zeitraum von 1856 bis 2005. Die Abweichungen der Temperatur sind hier relativ zum Bezugszeitraum 1961 bis 1990 angegeben. Darunter ist zum Vergleich die Entwicklung der lokalen Jahresmitteltemperatur für Potsdam im Zeitraum von 1893 bis 2015 dargestellt.





Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Gerstengarbe/Werner 2007: 34 (oben), 39 (Mitte) und PIK-Klimadaten 2016 (unten)

1.1 Klimaparameter

Das Klima an einem geographischen Ort oder an mehreren Orten einer zusammenhängenden Region wird durch Klimaparameter beschrieben, die die Gesamtheit der Witterungserscheinungen in der Atmosphäre über einen längeren Zeitraum kennzeichnen. Zu diesen Klimaparametern gehören beispielsweise *mittlere Jahrestemperatur*, *tiefste und höchste gemessene Temperatur*, *mittleres tägliches Minimum des kältesten bzw. Maximum des wärmsten Monats* oder die *mittlere tägliche Temperaturschwankung*. Weitere Parameter in Bezug auf Niederschlag, Bewölkung, Feuchte, Sonnenschein und Windgeschwindigkeit kommen hinzu, um das Klima zu charakterisieren. Traditionell versteht die Meteorologie das Klima als die statistische Beschreibung des Wetters über einen genügend langen Zeitraum von Monaten bis zu Tausenden oder Millionen von Jahren. Der klassische, von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definierte Zeitraum (Klimanormalperiode) erfasst 30 Jahre; die letzte komplette Klimanormalperiode war 1961 bis 1990 (vgl. ARL 2013). Die Abbildung 1 zeigt die Entwicklung des Klimaparameters *Jahresmittel der Lufttemperatur an der Erdoberfläche* über einen Zeitraum von über 100 Jahren für drei unterschiedliche räumliche Bezüge: global, regional für Deutschland und lokal für Potsdam (Gerstengarbe/Werner 2007). Die drei Temperaturverläufe sind unterschiedlich, zeigen aber alle eine Zunahme etwa ab 1970, ein Anzeichen für den derzeitigen Klimawandel. Will man diese oder auch die früheren Klimaveränderungen in der Erdgeschichte verstehen, muss man neben der Atmosphäre weitere Klimaelemente einbeziehen.

1.2 Klima und Wetter

Das Wetter kann man täglich erleben, wir erfahren Hitze oder Kälte und somit, was Temperatur bedeutet. Ebenso lernen wir andere kurzzeitige Zustände der Atmosphäre kennen, wie Wind, Niederschlag als Regen, Schnee oder Hagel, Sonnenschein und Bewölkung. Wir wissen auch, ob eine gerade herrschende Wettersituation typisch für Region und Jahreszeit oder eher außergewöhnlich oder gar extrem ist. Bei räumlich weiter entfernten oder zeitlich länger zurückliegenden Wettersituationen fehlt meist die Erfahrung, und wir sind auf Beobachtungsdaten und Erfahrungen anderer angewiesen. Das ist vor allem beim Klima so, wobei zwar auch von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer die Rede ist, es sich jedoch nicht um sinnlich erfahrbare Zustände, sondern um berechnete, abstrakte Größen handelt, wie beispielsweise die dargestellte Jahresmitteltemperatur. Dies gilt selbst für den lokalen Temperaturverlauf, der aus vielen täglichen Messwerten an einem Ort aggregiert wird, und umso mehr für regional oder global aus den Messwerten an vielen Orten rechnerisch aggregierten Ergebnissen.

1.3 Makroklima und Klimazonen

Das Makroklima (Großklima) der Erde lässt sich nach verschiedenen Kriterien in Klimazonen einteilen, basierend z. B. auf der großräumigen Zirkulation in der Atmosphäre oder den Zusammenhängen zwischen Vegetation und Klimaparametern. Weit verbreitet sind Klassifikationen, die auf Schwellenwerten von Temperatur und Niederschlag basieren und die jahreszeitlichen Schwankungen dieser Parameter berücksichtigen. Die auf diese Weise abgeleiteten Klimazonen der Erde entsprechen verschiedenen Typen von Ökosystemen (► *Ökologie*) mit unterschiedlicher Flora und Fauna sowie verschiedenen Typen von Wetterereignissen. Die Regionen der Erde unterscheiden sich erheblich, und in ihnen werden jeweils spezifische Wettererscheinungen mit unterschiedlichem Jahresgang beobachtet, wie z. B. Winterstürme in Europa oder tropische Wirbelstürme in wärmeren Regionen. Regional unterschiedlich in Stärke und Häufigkeit sind auch Gewitterstürme, Starkniederschlagsereignisse, Trocken- und Regenzeiten, Monsun- oder Passatwinde. Das globale Klima der Erde umfasst all diese verschiedenen Wettererscheinungen in ihrer geographischen und jahreszeitlichen Variabilität. Beim derzeit ablaufenden Klimawandel beobachtet man aber bereits deutliche räumliche und qualitative Veränderungen der Klimazonen und auch der damit verbundenen Wetterereignisse (vgl. Gerstengarbe/Werner 2007).

1.4 Meso- und Mikroklima von Region, Land und Stadt

Unterhalb der räumlichen Dimension des Makroklimas hängt das Mesoklima einer Stadt oder einer Landschaft von der Orographie (dem Geländere Relief) und der Höhe über dem Meeresspiegel ab. Es wird ferner durch Art und Größe anliegender Gewässer sowie durch Besiedlungs- oder Nutzungsstrukturen (z. B. ► *Landwirtschaft* und ► *Forstwirtschaft*) beeinflusst. Klimatische Einflussfaktoren sind Luftströmungen, Strahlungseigenschaften der Flächen – die sogenannte Albedo – sowie Wasserspeicherkapazität, Feuchtigkeit und Verdunstung bzw. Evapotranspiration der Vegetation. Der kleinräumige Austausch von Wärme, Energie, Wasser und anderen Stoffen zwischen Boden, Pflanzen und bodennahen Luftschichten ist der Bereich des Mikroklimas.

Die engen Beziehungen zwischen Ökologie und Klima werden beispielsweise bei den Unterschieden zwischen räumlich benachbartem Stadt- und Landklima spürbar. In der Stadt führt die Bebauung durch strahlungsbedingte Aufheizung, Abwärme und Emissionen von

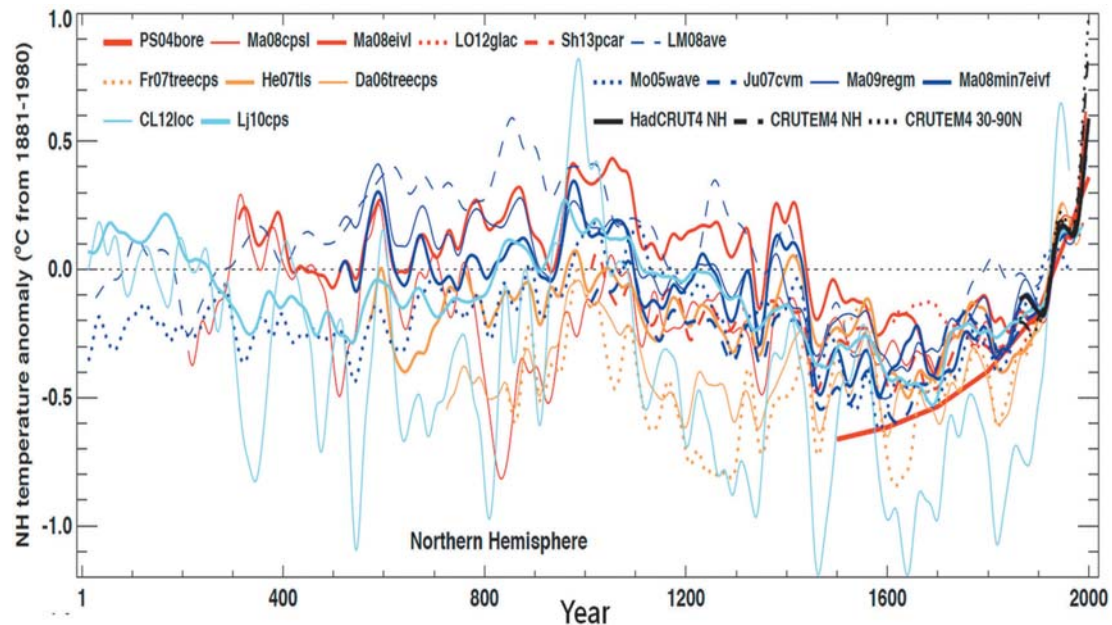
luftverunreinigenden Stoffen sowie durch die Behinderung des Luftaustausches zu einem Stadtklima, das in der Regel wärmer ist als das des Umlands. Demgegenüber herrschen im Freiland durch Luft- und Strahlungsaustausch meist kühlere Temperaturverhältnisse gegenüber der Stadt, während insbesondere der Wald im Stammraum eher gemäßigte Temperaturverhältnisse im Vergleich zum umgebenden Freiland aufweist. Die Abschirmung durch das Kronendach vermindert Ein- und Ausstrahlung am Waldboden, und es ist am Tag und im Sommer im Wald kühler, in der Nacht und im Winter wärmer. Ein besonderes Beispiel für die Klimafunktion von Ökosystemen liefert der tropische Regenwald. Waldökosysteme speichern Wasser im Boden und verdunsten es verstärkt in der Tageshitze, wobei die Bäume vermehrt organische Substanzen in die Luft abgeben, die als Kondensationskeime wirken (vgl. Pöschl/Martin/Sinha et al. 2010). Neben dem Kühlungseffekt unterstützt die Verdunstung so auch die Wolkenbildung, vermindert somit eine schädigende Aufheizung durch die mittägliche hohe Sonneneinstrahlung und der sich aus den Wolken ergießende Regen bringt das verdunstete Wasser wieder zurück. Ökosysteme erfüllen mit solchen Prozessen wichtige Regelfunktionen im Klimasystem. Das regionale immerfeuchte Regenwaldklima verschwindet nach großflächigen Abholzungen und wird zum Wüstenklima, wobei neben den veränderten Strahlungsverhältnissen vor allem der Wasserkreislauf unterbrochen wird. Festzuhalten ist, dass zum Verständnis des Klimas die Biosphäre mit ihrer Vegetation und ihrer Regelfunktion neben der Atmosphäre eine wichtige Rolle spielt.

2 Das Klima als veränderliches System

2.1 Rekonstruktion früherer Klimaveränderungen

Die Klimaforschung konnte in den letzten zwei Jahrzehnten bedeutende Fortschritte zum Verständnis früherer Klimaveränderungen und des Klimasystems erzielen. Zur Rekonstruktion des Klimas der Vergangenheit, als noch keine instrumentelle Aufzeichnung existierte, werden sogenannte Klimaproxy (engl. proxy: Stellvertreter) herangezogen. Klimaproxy sind indirekte Anzeiger des Klimas, die in natürlichen Archiven wie Baumringen, Stalagmiten, Eisbohrkernen, Korallen, See- oder Ozeansedimenten, Pollen oder in menschlichen Archiven wie historischen Aufzeichnungen oder Tagebüchern aufzufinden sind. Klimaproxy müssen in der Regel instrumentell kalibriert werden, um quantitative Daten vergangener Klimazustände zu gewinnen, wie Temperaturen, Zusammensetzung der Atmosphäre, Sonneneinstrahlung usw. Die Abbildung 2 zeigt Temperaturrekonstruktionen der letzten 2.000 Jahre auf der Nordhalbkugel aus verschiedenen Klimaproxydaten (Masson-Delmotte/Schulz/Abe-Ouchi et al. 2013). Die verschiedenen Kurvenverläufe beschreiben unterschiedliche regionale Klimaverhältnisse. Die Daten belegen, dass es heute generell wärmer ist als zur mittelalterlichen Warmzeit. Dennoch finden sich immer noch gegenteilige Behauptungen in nicht wissenschaftlichen Publikationen. Für die Klimaveränderung von der mittelalterlichen Warmzeit zur sogenannten kleinen Eiszeit gibt es in historischen Dokumenten eine Vielzahl von Hinweisen auf Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Zivilisation (Glaser 2001).

Abbildung 2: Rekonstruktion von regionalen Temperaturänderungen auf der Nordhalbkugel über die letzten 2.000 Jahre. Die verschiedenfarbigen Linien repräsentieren unterschiedliche Regionen und Datenquellen.



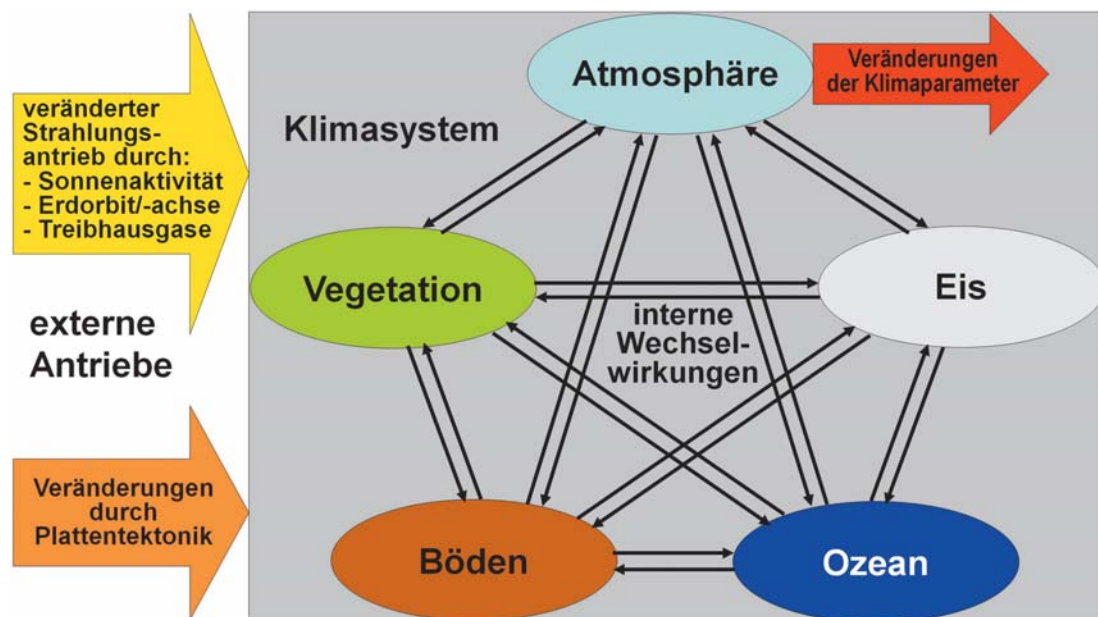
Quelle: Masson-Delmotte/Schulz/Abe-Ouchi et al. 2013: 409

Zum Verständnis der Ursachen und Zusammenhänge von Veränderungen des globalen oder regionalen Klimas leisten Klimamodelle einen wesentlichen Beitrag. Dies sind Modelle, die das wachsende Wissen über das Klimasystem der Erde beinhalten.

2.2 Elemente des Klimasystems

Zum globalen Klimasystem, wie es in der Abbildung 3 skizziert ist, gehören neben der Atmosphäre mit Wind, Wetter, Wolken und Treibhausgasen die Sonneneinstrahlung, die Hydrosphäre mit den Ozeanen, die Lithosphäre mit Kontinenten, Gebirgen und Vulkanen, die Kryosphäre mit Gletschern, Meereisbedeckung und den gewaltigen Eismassen auf Grönland und in der Antarktis sowie, wie bereits angemerkt, Vegetation und Tiergemeinschaften in der Biosphäre mit bewirtschafteten und unbewirtschafteten Ökosystemen. Zwischen den Bestandteilen dieses komplexen Klimasystems werden Energie, Informationen und Stoffe ausgetauscht – sie wechselwirken miteinander. Dabei verändern sich zum Beispiel die Strahlungseigenschaften der Erdoberfläche oder die Zusammensetzung der Erdatmosphäre und darüber das Klima. Lebewesen und Ökosysteme sind daher nicht nur Klimaindikatoren, sondern Akteure im Klimasystem. Je nach Bedeckung der Landoberfläche mit Eis, Wald, Steppe oder Wüste oder infolge von Wolkenbildung ergeben sich veränderte Strahlungsbilanzen und somit ein veränderter Einfluss auf das Klima.

Abbildung 3: Elemente des Klimasystems der Erde. Interne Wechselwirkungen zwischen ihnen führen zu nicht linearen Reaktionen des Klimasystems auf externe Einflüsse wie Sonneneinstrahlung oder Veränderungen der Treibhausgasanteile in der Atmosphäre.



Quelle: Eigene Darstellung nach Stock 2013: 19

2.3 Astronomische Klimafaktoren

Bedeutendster Strahlungsantrieb ist die auf die Erde treffende Strahlung der Sonne. Sie ist dafür verantwortlich, dass auf der Erde lebensermöglichende Klimabedingungen mit flüssigem Wasser herrschen. Die Sonneneinstrahlung verändert sich aber mit der Zeit. Zum einen variiert die Aktivität und Leuchtkraft der Sonne selbst, beispielsweise in einem etwa 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus. Die Anzahl der Sonnenflecken ist ein Indikator für die Aktivität der Sonne: Je mehr Sonnenflecken und damit Energieumsatz, desto stärker ist die Strahlung der Sonne. Zum anderen verändert sich die Sonneneinstrahlung auf die Erde mit Veränderungen der Erdbahn um die Sonne (Exzentrizität), der Neigung der Erdachse (Obliquität oder Schiefe) sowie ihrer Pendelbewegung (Präzession). Diese Erdbahn- oder Orbitalparameter zeigen verschiedene zyklische Schwankungen, sogenannte Milanković-Zyklen, von denen der 100.000-Jahre-Zyklus derzeit den weitaus stärksten Einfluss auf das Klima hat. Die Veränderungen sind wesentlich für die Erklärung der Klimaveränderungen in den Eiszeiten (Berger/Loutre 1991). Zum Verständnis dieser Zusammenhänge leisten Klimamodelle einen bedeutenden Beitrag. Die Abbildung 4 aus dem fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC 2013) zeigt die Rekonstruktion von Klimadaten der Erde aus den vergangenen 800.000 Jahren (Masson-Delmotte/Schulz/Abe-Ouchi et al. 2013). Die zeitlichen Veränderungen von neun Parametern in den Linien (a bis i) repräsentieren den Erdbahn-/Orbitalantrieb und die farbigen Flächen repräsentieren Simulationsergebnisse

Klima, Klimawandel

mit mehreren Klimamodellen, beispielsweise dem CLIMate and BiosphERE model, CLIMBER-2 (Ganopolski/Calov 2011). Der Antrieb der Modelle erfolgt durch die Veränderung der Erdbahnparameter (Orbitalparameter) und der atmosphärischen Konzentration der wirksamen Treibhausgase. Die Abbildung 4 zeigt oben:

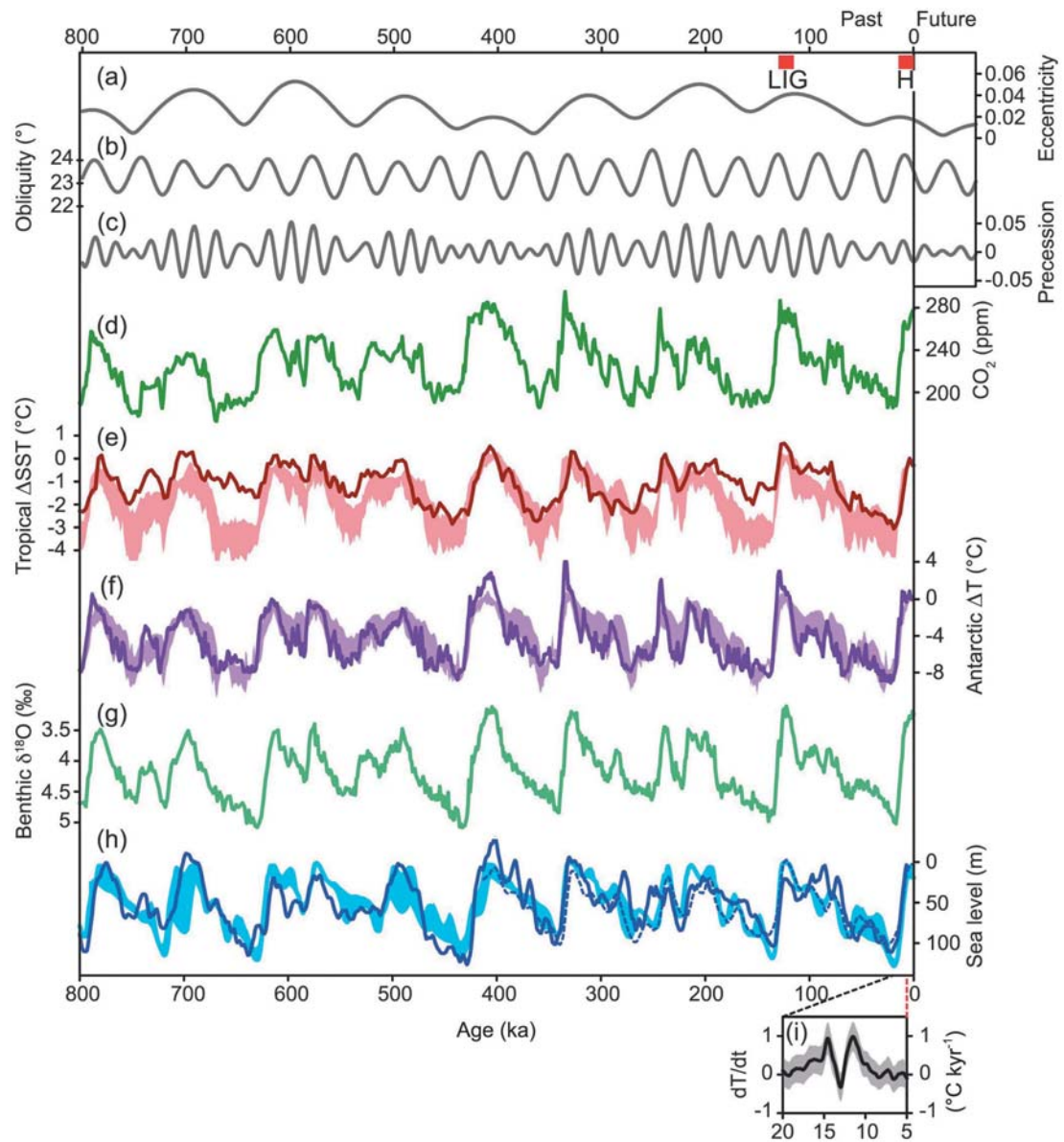
- a) Exzentrizität,
- b) Obliquität und
- c) Präzession.

Auch die zukünftigen Veränderungen dieser astronomischen Parameter sind bekannt. Die Abbildung 4 zeigt darunter die rekonstruierten Reaktionen des Klimasystems auf diese Veränderungen (Masson-Delmotte/Schulz/Abe-Ouchi et al. 2013).

- d) Die atmosphärische Konzentration des Treibhausgases CO₂ aus Eisbohrkernen der Antarktis (ermittelt u. a. von Lüthi/Le Floch/Bereiter et al. 2008)
- e) Die Temperatur der Meeresoberfläche in den Tropen (Herbert/Peterson/Lawrence et al. 2010)
- f) Die Temperatur in der Antarktis auf der Basis von bis zu sieben Eisbohrkernen, ermittelt u. a. im Rahmen des „European Project for Ice Coring in Antarctica“ (EPICA) (Oerter 2006)
- g) Rekonstruktion der Temperaturen in der Tiefsee aus 57 global verteilten Sedimentproben anhand des 18O-Anteils in Kalkschalen benthischer Organismen, auch ein Proxy für das globale Eisvolumen (Lisiecki/Raymo 2005)
- h) Rekonstruktion des Meeresspiegels, gestrichelte Linie: (Rohling/Braun/Grant et al. 2010); durchgezogene Linie: (Elderfield/Ferretti/Greaves et al. 2012)
- i) Die kleine Grafik im unteren Teil von Abbildung 4 zeigt die relativen, teilweise schnellen Temperaturänderungen zum Ende der letzten Eiszeit (Shakun/Clark/He et al. 2012).

Die Übergänge von Phasen großflächiger Vereisung zu interglazialen Warmperioden erfolgten in wenigen Tausend Jahren. Der Prozess wurde wahrscheinlich eingeleitet durch das Abtauen von Eisflächen, was eine rasche Erwärmung durch die verringerte Albedo zur Folge hat, gefolgt von der langsamer ablaufenden Verstärkung durch den Anstieg der Treibhausgase. Im Vergleich zum Auf und Ab des Klimas in den Eiszeiten ist es in den letzten 10.000 Jahren, dem Holozän (H), relativ stabil, vergleichbar mit der letzten warmen Interglazialzeit vor etwa 120.000 Jahren (LIG).

Abbildung 4: Rekonstruktion von Erdbahnparametern und Klimadaten der Erde aus den vergangenen 800.000 Jahren

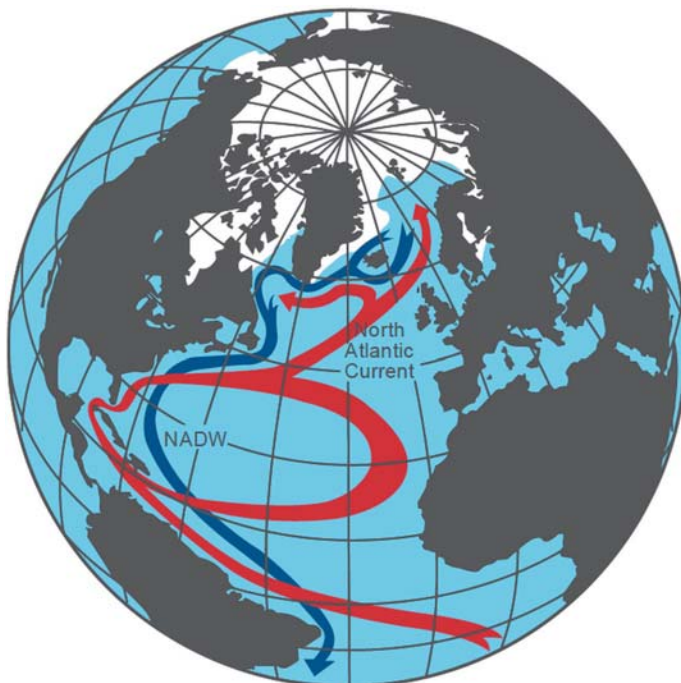


Quelle: Masson-Delmotte/Schulz/Abe-Ouchi et al. 2013: 400

2.4 Geologische Klimafaktoren

Geologisch sich sehr langfristig verändernde Faktoren, wie die Verschiebung der Kontinentalplatten und die Verteilung zwischen Kontinenten und Ozeanen, beeinflussen das Klima ebenso wie sich relativ kurzfristig verändernde, etwa Vulkanausbrüche oder Änderungen der ozeanischen Strömungen, wie zum Beispiel bei den El-Niño- und La-Niña-Ereignissen im Pazifik. Die in Abbildung 5 ausschnittsweise für den Atlantik dargestellten großräumigen Strömungsbänder von warmen Oberflächen- (rot) und kalten Tiefenströmungen (blau) in den Ozeanen sorgen für einen effektiven Wärmeaustausch zwischen den heißen Äquatorzonen und kälteren Regionen.

Abbildung 5: Großräumige Strömungsbänder von warmem Oberflächen- (rot) und kaltem Tiefenwasser (blau) im Atlantik



Quelle: Rahmstorf 1997: 825

In Europa kommt es durch den Nordatlantikstrom in Verlängerung des Golfstroms im Vergleich zu Alaska zu einem weitaus günstigeren Klima, in dem optimal Ackerbau betrieben werden kann. Das zuvor in der Abbildung 4 gezeigte Auftreten von Warm- und Kaltperioden während der Eiszeiten lässt sich mit der Reaktion dieser ozeanischen Strömungen auf Schwankungen der Sonneneinstrahlung erklären. Antrieb der Strömung ist der Dichteunterschied zwischen dem warmen, salzhaltigen Wasser der Oberflächenströmung und dem kalten, salzarmen Schmelzwasser bei Grönland. Während der Eiszeiten konnte dieser Antrieb zwischen zwei Zuständen pendeln (vgl. Rahmstorf 2002). In den Warmperioden ähnelte die Strömung im Nordatlantik nahezu dem heutigen Zustand. Sehr kalte Perioden traten auf, wenn diese Strömung aussetzte, wahrscheinlich durch zu starkes Abschmelzen der Eismassen.

Die Land-Ozean-Verteilung sowie Orographie und Strahlungseigenschaften der Erdoberfläche sind von großer Bedeutung für das Klimasystem, je nach Bedeckung mit Eis, Schnee, Wasser, Sand oder Vegetation. Dabei spielt das Zeitverhalten der Prozesse eine Rolle. Land erfährt beispielsweise schnellere Temperaturänderungen als Wasser, das Abtauen von Schnee- und Eisflächen kann schneller erfolgen als die anschließende Freisetzung von Treibhausgasen aus Böden oder Feuchtgebieten. Vulkanismus und andere geologische Prozesse sind weitere Klimafaktoren, die auch die Erdoberfläche oder die Zusammensetzung der Atmosphäre und damit die Strahlungseigenschaften verändern.

2.5 Atmosphärische Klimafaktoren

Nach der Sonneneinstrahlung sind die Strahlungseigenschaften von Atmosphäre und Erdoberfläche – bekannt unter den Begriffen *Treibhauseffekt* und *Albedo* – der zweite wesentliche Klimantrieb. Ein Teil von etwa 30 % der Strahlung von der Sonne wird an Wolken oder hellen Oberflächen reflektiert. Dies ist die sogenannte Albedo. Der natürliche, also auch ohne den Menschen zustande kommende Treibhauseffekt hängt damit zusammen, dass die Atmosphäre für sichtbares Licht nahezu durchlässig ist, während die von jeder Materie entsprechend ihrer Temperatur im Infraroten (IR) ausgehende Wärmestrahlung zu wesentlichen Anteilen absorbiert wird. Die Absorption von IR-Strahlung in der Atmosphäre wird durch verhältnismäßig geringe Anteile an Molekülen aus mehr als zwei Atomen bewirkt. Aufgrund ihrer Bindungsstruktur schwingen die Atome im Molekül dergestalt, dass sie IR-Strahlung entsprechender Frequenzen absorbieren und emittieren können. Zu diesen sogenannten Treibhausgasen zählen vor allem auch Wasserdampf (H_2O), daneben Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) sowie Stickstoffoxide, wie Lachgas (N_2O), und die durch den Menschen freigesetzten fluorierten Gase, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6).

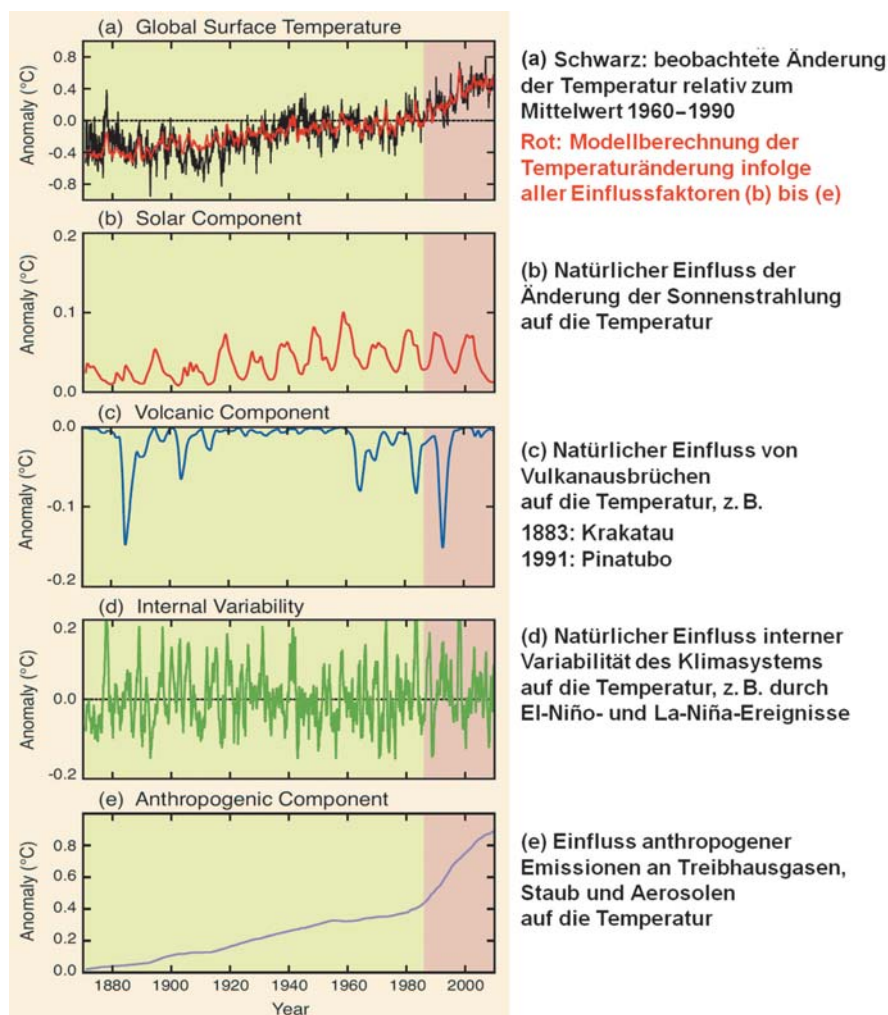
Die Erdoberfläche wie auch die Atmosphäre nehmen durch Sonneneinstrahlung und den Treibhauseffekt Energie auf, geben durch Wärmestrahlung aber auch wieder Energie an die Atmosphäre und schließlich an den Weltraum ab. Im unteren Bereich der Atmosphäre, der Troposphäre, baut sich dabei bis zum Gleichgewicht zwischen einfallender und ausgehender Strahlung ein Temperaturgefälle auf, mit höherer Temperatur an der Erdoberfläche und mit in zunehmender Höhe niedrigeren Temperaturen. Der resultierende Treibhauseffekt wirkt wie ein erhöhter Strahlungsantrieb durch die Sonne, gemessen in W/m^2 . Gegenspieler der Treibhausgase sind Staub und Aerosole mit Schwefeldioxid (SO_2) oder Ruß, freigesetzt aus Vulkanen, Verbrennungs- oder anderen Prozessen, die zeitweise das einfallende Sonnenlicht abschirmen oder z. B. durch verstärkte Wolkenbildung abweisen können.

3 Der derzeitige Klimawandel

3.1 Wissenschaftliche Daten zum derzeitigen Klimawandel

Der Weltklimarat IPCC hat 2013 und 2014 den Fünften Sachstandsbericht (AR5) zum derzeitigen Klimawandel und seinen möglichen Auswirkungen veröffentlicht (IPCC 2013, 2014a, 2014b). Der Bericht bestätigt frühere Feststellungen mit noch größerer Sicherheit dahingehend, dass sich das Klima gegenwärtig eindeutig ändert und dass dies auf menschlichen Einflüssen beruht, hauptsächlich auf der Freisetzung von Treibhausgasen, vor allem von CO_2 .

Abbildung 6 : (a) Abweichung der globalen Jahresmitteltemperatur von 1870 bis 2010 relativ zum Mittelwert für 1960 bis 1990. (b) bis (d) Temperaturänderungen durch natürliche Einflussfaktoren und (e) durch anthropogene Emissionen



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Masson-Delmotte/Schulz/Abe-Ouchi et al. 2013: 393
1088

Die Abbildung 6 zeigt die globale Erwärmung der Atmosphäre von 1870 bis 2010 und welche verschiedenen Beiträge dabei eine Rolle spielen (Masson-Delmotte/Schulz/Abe-Ouchi et al. 2013). Grundlage sind verschiedene Beobachtungsdaten zu Temperatur an der Erdoberfläche, Sonnenaktivität und -strahlung, Vulkanausbrüchen, ozeanischen Strömungen sowie Daten zu den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen, Staub und Aerosolen. Mithilfe von Klimamodellen lassen sich die jeweiligen Anteile der natürlichen und anthropogenen Einflüsse auf das Klima berechnen. Die Analyse ergibt, dass zumindest ab 1985 die anthropogenen Emissionen an Treibhausgasen Hauptursache des Temperaturanstiegs sind. Die Sonne spielt, anders als während der Eiszeiten, derzeit nur eine untergeordnete Rolle, ebenso wie andere natürliche Einflüsse durch Vulkane oder die interne Variabilität des Klimasystems. Zwischen 1998 bis 2013 erfolgte der Temperaturanstieg in der Atmosphäre langsamer als in den Jahrzehnten zuvor.

In den Medien wurde die Frage gestellt, ob die globale Erwärmung zwischen 1995 und 2010 eine Pause eingelegt hat. Es gibt drei Faktoren für den zeitweise geringeren Anstieg: kurzfristige interne Schwankungen im Klimasystem, z. B. durch Eintrag von Energie in die Ozeane, das beobachtete Minimum im 11-jährigen Sonnenzyklus und ein kühlender Effekt durch Aerosole aus mehreren Vulkanausbrüchen. Dennoch kann von einer Pause der globalen Erwärmung nicht die Rede sein, wie das El-Niño-Jahr 2014 zeigte, das bis dahin wärmste Jahr seit Beginn der Messungen.

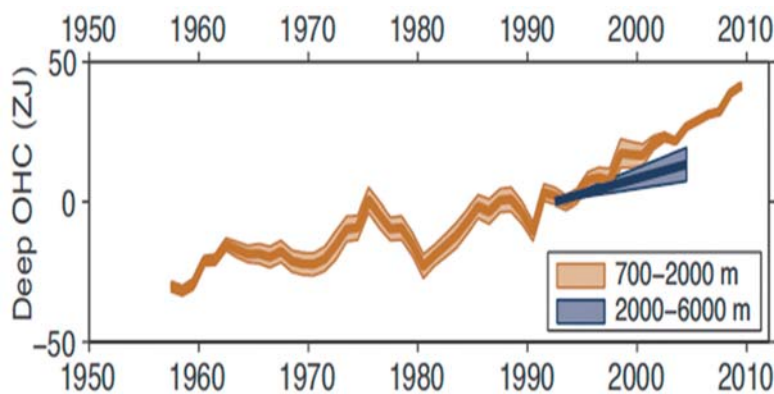
3.2 Beobachtete Folgen des Klimawandels

Seit Mitte des letzten Jahrhunderts und verstärkt etwa ab 1980 werden zunehmend vielfältige Veränderungen beobachtet, die in dieser Form und Geschwindigkeit einzigartig im Vergleich zu den Veränderungen in den zurückliegenden Jahrzehnten und sogar Jahrtausenden sind. Nicht nur die Temperatur der unteren Atmosphäre steigt, auch die Ozeane erwärmen sich, Gletscher tauen, Permafrostböden werden wärmer, Eisschilde verlieren an Masse, der Meeresspiegel steigt weiter an, ebenso nimmt die Versauerung der Meere durch aufgenommenes Kohlendioxid zu. Neue, verbesserte und erweiterte Messsysteme in den Weltmeeren zeigen, dass die Ozeane im Zeitraum von 1971 bis 2010 mehr als 90 % der Energie, die dem Klimasystem zusätzlich zugeführt wurde, aufgenommen und gespeichert haben (s. Abb. 7). Dabei zeigt sich keine „Erwärmungspause“. Am stärksten erwärmten sich die Schichten nahe der Wasseroberfläche. In den oberen 75 Metern stieg die Temperatur von 1971 bis 2010 im Mittel um 0,11 °C pro Dekade an. Auch im tieferen Ozean hat sich das Wasser bereits erwärmt.

Eine physikalische Folge der Erwärmung von Atmosphäre und Ozean ist eine größere Menge an Wasser in Form von Dampf und Tröpfchen in der Atmosphäre. Bei einer globalen Erwärmung von derzeit etwa 1 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau kann dies etwa 7 % mehr Wasser im Wasserkreislauf bedeuten. Eine weitere Folge der Erwärmung ist der Rückgang des arktischen Meereises (IPCC 2013). Dies wiederum verändert großräumige atmosphärische Strömungen wie den Jetstream und das Auftreten und die Dauer extremer Wetterereignisse wie Hitze- und Dürreperioden oder Starkniederschläge (Petoukhov/Petri/Rahmstorf et al. 2016). Die Veränderungen der Niederschläge erfolgen regional in sehr unterschiedlicher Weise. Zwischen 1950 und 2008 stiegen die Niederschläge in feuchten Regionen der Tropen und in mittleren Breiten der Nordhalbkugel, während sie in trockenen Regionen der Subtropen abnahmen. Bei vielen extremen Wetterereignissen wurden Veränderungen beobachtet. So hat seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts die Zahl der kalten Tage und Nächte abgenommen und die der warmen Tage und Nächte zugenommen. In Europa, Asien und Australien traten häufiger Hitzewellen auf. Die

Starkregenereignisse in Nordamerika und Europa sind häufiger und intensiver geworden und dies deutet sich auch bei Hochwasserereignissen an. Mithilfe von kombinierten Klima- und Abflussmodellen lässt sich für vergangene, gut dokumentierte Hochwasserereignisse nachprüfen, ob sie ohne den seinerzeit schon vorangeschrittenen Klimawandel anders ausgefallen wären. Es zeigt sich mehrfach, beispielsweise bei der Flutkatastrophe in England im Herbst 2000, dass sich das Hochwasserrisiko (\triangleright *Hochwasserschutz*) durch den anthropogenen Klimawandel bereits erhöht hat (Pall/Aina/Stone et al. 2011).

Abbildung 7: Entwicklung der Wärmeaufnahme (Oceanic heat content – OHC) im tieferen Ozean in Zetajoule = 10^{21} J



Quelle: IPCC 2013: 262

3.3 Computermodelle des Klimasystems

Eine Analyse der nicht linearen Dynamik komplexer Systeme und damit eine Analyse der Zusammenhänge von Ursachen und Wirkungen ist im Allgemeinen nur mithilfe von Computermodellen möglich, in denen der Stand des Wissens über Systemkomponenten, ihre Wechselwirkungen untereinander sowie die Reaktion auf äußere Einflüsse in mathematische und numerische Beziehungen übersetzt wird. Wie alle derartigen Modelle mit Bezug zu Beobachtungsgrößen sollen Klimamodelle die komplexen Vorgänge im Klimasystem einerseits so realitätsnah wie möglich und andererseits notwendigerweise so einfach wie möglich darstellen. Die Modelle haben zwei wesentliche Funktionen: Zum einen dienen sie dazu, das wissenschaftliche Wissen im Vergleich von Simulation und Beobachtungs-, Mess- oder Rekonstruktionsdaten zu überprüfen und zu ertüchtigen, wie zuvor bei der Analyse des Paleoklimas beschrieben. Zum anderen besteht nur mithilfe von derart ertüchtigten Computermodellen eine realistische Chance, zukünftig mögliche Entwicklungen eines nicht linearen Systems abzuschätzen. Eine simple Extrapolation der Vergangenheit unter veränderten Parametern in die Zukunft ist schon bei linearen Systemen zu unsicher für eventuelle Prognosen.

Globale Klimamodelle simulieren das Klimasystem der Erde und seine Dynamik auf der Grundlage von physikalischen Gesetzen durch mathematische Gleichungen, die in einem dreidimensionalen Gitternetzsystem rund um den Globus gelöst werden. Diese Gleichungen bilden die Komponenten und Subsysteme des Klimasystems mit ihren Veränderungen und

Wechselwirkungen ab. Atmosphäre und Ozean sind die wichtigsten Subsysteme des Klimasystems. Klimamodelle, die diese Prozesse global abbilden, werden als allgemeine Zirkulationsmodelle bezeichnet (GCM, engl. General Circulation Models). Die gängigen GCM-Modelle wurden aus Wettermodellen weiterentwickelt. Ein typisches globales Klimamodell unterteilt die Atmosphäre und den Ozean vertikal in eine Vielzahl von diskreten Schichten, die jeweils als zweidimensionales Gitter abgebildet sind. Im Modell werden die Gleichungen für den Transport von Wärme, Impuls, Feuchtigkeit (in der Atmosphäre) und Salzgehalt (im Ozean) auf diesem dreidimensionalen Gitter gelöst. Alle Prozesse, die sich auf Skalen kleiner als die Maschenweite dieses Gitters abspielen, z. B. die Wolkenbildung, werden parametrisiert, d. h., ihre Eigenschaften werden in Abhängigkeit von den Variablen an den Gitterknoten über eine Gitterzelle gemittelt. Die globalen Klimamodelle können in heute möglicher Auflösung die mittleren jahreszeitlichen Temperaturverhältnisse und ihre geographische Verteilung gut wiedergeben, hinsichtlich des Niederschlags und anderer regional wichtiger Parameter sind die Ergebnisse aber noch recht ungenau. Die globalen Klimamodelle werden durch eingebettete regionale Klimamodelle mit höherer Auflösung ergänzt, die sich besser an spezifische regionale Besonderheiten anpassen lassen. Zur Eingrenzung der Unsicherheiten und zur Absicherung der Ergebnisse erfolgen Vergleichsrechnungen mit verschiedenen Modellen und mehreren Rechenläufen der Modelle mit leicht veränderten Anfangsbedingungen sowohl für zurückliegende Zeiträume mit Beobachtungsdaten als auch für die zukünftige Klimaentwicklung. Zu regionalen Klimaszenarien finden sich Angaben unter anderem bei Walkenhorst und Stock (2009) oder bei Jacob (2012).

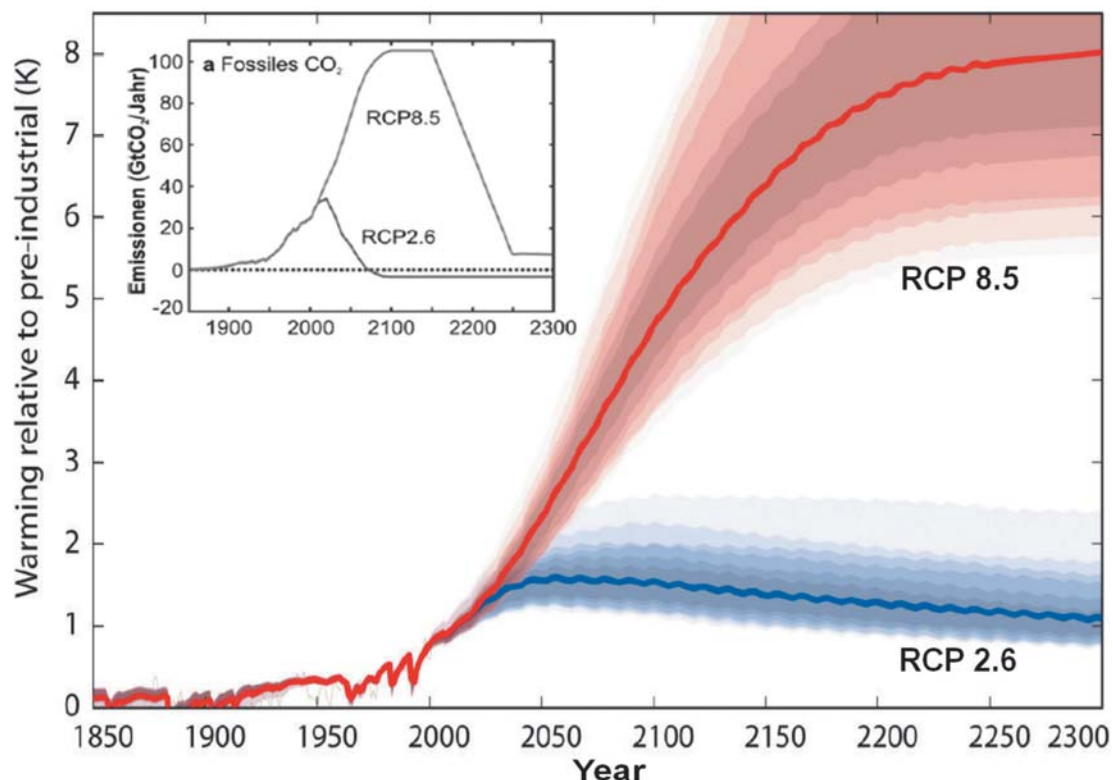
3.4 Klimaszenarien möglicher zukünftiger Klimaentwicklungen

Wie sich zukünftig das Klima auf der Erde weiterentwickeln wird, hängt im Wesentlichen davon ab, welche Emissionen an Treibhausgasen und anderen strahlungsrelevanten Stoffen die menschliche Zivilisation zusätzlich zu den bisher emittierten in die Atmosphäre freisetzt. Bisher wurden dafür die sogenannten SRES-Szenarien A1, B1, A2 und B2 verwendet (► *Szenario*). Für den neuen Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC 2013) wurden neue, sogenannte „Repräsentative Konzentrationspfade“ (Representative Concentration Pathways – RCP) mit hinsichtlich Energie, Ökonomie, Klima und Landnutzung gekoppelten Modellen erstellt. Diese Modelle bilden alle Treiber anthropogener Treibhausgasemissionen von CO_2 , CH_4 , NO_x usw. ab und setzen sie in konsistente Szenarien zukünftig resultierender Strahlungsantriebe um. Es werden vier verschiedene Pfade berechnet: Drei erreichen einen anthropogenen Strahlungsantrieb von $8,5 \text{ W/m}^2$ (sehr hoch), 6 W/m^2 (hoch) bzw. $4,5 \text{ W/m}^2$ (mittel) im Jahr 2100. In einem weiteren Pfad wird der (relativ niedrige) anthropogene Strahlungsantrieb $2,6 \text{ W/m}^2$ im Jahr 2100 nur dadurch erreicht, dass etwa ab dem Jahr 2080 negative Emissionen angenommen werden, d. h., dass CO_2 wieder aus der Atmosphäre zurückgeholt wird. Auf Grundlage der RCP wurden mithilfe von Klimamodellen neue Projektionen möglicher Klimaveränderungen im 21. Jahrhundert und darüber hinaus berechnet. Die Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der globalen Mitteltemperatur an der Oberfläche relativ zum vorindustriellen Wert im Zeitraum 1850 bis 2300, bis 2011 basierend auf Beobachtungsdaten, danach die mit einem Ensemble verschiedener Klimamodelle berechnete Entwicklung für zwei RCP-Szenarien (Meinshausen/Smith/Calvin et al. 2011). Die Flächen zeigen die Bandbreite verschiedener Modellrechnungen, die Linien den sich daraus ergebenden gemittelten Verlauf der Temperaturen. Als verkleinerte Grafik sind die zugehörigen CO_2 -Emissionen eingeblendet.

Klima, Klimawandel

Das Szenario RCP 8.5 entspricht etwa dem „Business as usual“, d. h. einem „Weiter wie bisher“, was intensive Landnutzung, Rodung und die Emissionen fossiler Energieträger betrifft. Man kann davon ausgehen, dass die damit zu erwartenden Schäden z. B. durch Extremwetterereignisse, bald einen Wert von 5 % des globalen Pro-Kopf-Einkommens übersteigen können (Stern 2007). Dies würde wahrscheinlich auch die Belastungsgrenzen der Weltwirtschaft überschreiten und ließe sich kaum mehr durch adäquate Anpassungsmaßnahmen begrenzen (► *Klimaanpassung*), wie eine Untersuchung für die Weltbank zu der Frage ergab, wie eine Anpassung an eine „4-Grad-Welt“ aussehen könnte (World Bank 2012). Noch in diesem Jahrhundert wären infolge von zunehmenden extremen Hitze- und Dürreperioden in vielen Regionen der Erde Landwirtschaft und eine Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser und Nahrungsmitteln gefährdet. Oberhalb einer 2-Grad-Erwärmung ist mit einer außerordentlich starken Zunahme zahlreicher Risiken für Öko- und Siedlungssysteme zu rechnen (IPCC 2014a). Langfristig sind auch viele Küstenregionen und -städte durch den Anstieg des Meeresspiegels und durch Sturmfluten gefährdet.

Abbildung 8: Entwicklung der globalen Mitteltemperatur an der Oberfläche relativ zum vorindustriellen Wert im Zeitraum 1850 bis 2300; bis 2011 basierend auf Beobachtungsdaten, ab 2012 nach der mit Klimamodellen berechneten Entwicklung für zwei RCP-Szenarien mit unterschiedlichem Strahlungsantrieb von 2,6 bzw. 8,5 W/m². Eingebledet sind die zugehörigen CO₂-Emissionen.



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Meinshausen/Smith/Calvin et al. 2011: 233 und a) 228

Beim Klimaschutzszenario RCP 2.6 besteht dagegen eine hohe Wahrscheinlichkeit, die globale Erwärmung unter einer Grenze von 2 °C zu halten. Zumindest in entwickelten Ländern besteht dabei die Möglichkeit, auch die zu erwartenden Folgen für das Klima durch Anpassungsmaßnahmen in Grenzen zu halten. Die zu erwartenden Kosten für Investitionen in Anpassung, Energiewende und > *Klimaschutz* liegen weit unter den beim Szenario RCP 8.5 zu erwartenden Schadenskosten. Zudem können Investitionen sinnvollere volkswirtschaftliche Impulse geben als die Beseitigung von Schäden.

3.4 Umgang mit Unsicherheiten

Auf die Frage, wie sich das Klima in der Zukunft möglicherweise verändern wird, wird häufig auf die Unsicherheit solcher Aussagen verwiesen, manchmal auch um Zweifel an der Notwendigkeit von zeitnahen Maßnahmen zum Klimaschutz zu säen. Sollte man damit nicht warten, bis mehr Sicherheit besteht? Oft wird auch die Frage gestellt, wie man sichere Aussagen zum Klima in 100 Jahren machen kann, wenn schon eine Wetterprognose über mehrere Tage unsicher ist. Die Klimaforschung befasst sich daher intensiv mit Unsicherheiten verschiedener Art und mit der Frage, welche sich wie reduzieren lassen und welche nicht. Die Frage „Wie entsteht welche Zukunft?“ verdeutlicht, dass es nicht reduzierbare Unsicherheiten gibt, mit denen man einfach leben und umgehen muss, ironisch zugespitzt in der verschiedenen Autoren zugeschriebenen Aussage „Prognosen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen“ (> *Prognose*).

Bei Wetterprognosen konnten Unsicherheiten durch vertieftes Wissen über die meteorologischen Prozesse, durch umfangreichere und aussagekräftigere Beobachtungsdaten und präzisere numerische Wettermodelle deutlich verringert werden. Der im ungenauen Anfangswert wurzelnde Prognosefehler wächst mit jedem zukünftigen Tag an und wird durch eine Vielzahl von Rechenläufen mit leicht unterschiedlichen Anfangswerten eingegrenzt, wobei auch die Ergebnisse verschiedener Rechenläufe im Prinzip von Tag zu Tag mehr auseinanderlaufen. Das Resultat ist eine Statistik möglicher Wetterentwicklungen in einer Wahrscheinlichkeitsverteilung. Aussagen mit hoher Wahrscheinlichkeit sind relativ sicher, solche mit niedriger eher unsicher, aber nicht ausgeschlossen. So sind in der Regel Temperaturprognosen sicherer als Niederschlagsprognosen, Mittelwerte sicherer als Extremwerte und gebietsbezogene Angaben umso unsicherer, je kleinräumiger der Bezug ist, d. h., je konkreter eine Wetterangabe einen bestimmten Ort betreffen kann, umso unsicherer ist sie.

Beim Klimawandel liegt – anders als beim Wetter – die Quelle der Unsicherheit nicht in einem Anfangswert begründet, sondern in der Systemreaktion auf eine Änderung der Energiebilanz. Eine wesentliche Quelle von Unsicherheit hinsichtlich zukünftiger Klimaentwicklung ist die Entwicklung anthropogener Treibhausgasemissionen, die entscheidend vom Verhalten der Menschen abhängt. Da dies nicht vorhersagbar ist, spricht man nicht von Prognosen, sondern von Klimaprojektionen, die sich aus den verschiedenen Szenarien im Hinblick auf mögliche zukünftige Emissionen ableiten lassen. Für die in globalen und regionalen Klimamodellen dargestellten Grundlagen zum Klimawandel unterscheiden Stock und Walkenhorst (2012) vier Quellen für Unsicherheiten:

- 1) die Unsicherheit bezüglich zukünftiger Treibhausgasemissionen, d. h. der zukünftigen Entwicklung der das Klima bestimmenden natürlichen und anthropogenen Größen (darunter auch regionale Einflussgrößen wie z. B. die Art der Landnutzung und Aerosolemissionen),

- 2) die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den globalen Klimamodellen, deren Ergebnisse als Randbedingungen bzw. Eingangsgrößen regionaler Klimamodelle dienen,
- 3) die Unsicherheit durch Ungenauigkeiten in den regionalen Klimamodellen,
- 4) die sogenannte Sampling-Unsicherheit, die dadurch entsteht, dass das Klima im Modell immer auf Grundlage einer begrenzten Anzahl von Modelljahren geschätzt werden muss.

Wie bereits für das Wetter dargelegt, erhält man durch eine Vielzahl von Modellläufen mit verschiedenen Modellen und leicht unterschiedlichen Anfangswerten auch für das Klima eine Statistik mit Wahrscheinlichkeiten möglicher zukünftiger Entwicklungen. Dies zeigt sich in der Bandbreite der Temperaturverläufe in der Abbildung 8. Auch hier sind in der Regel Temperaturentscheidungen sicherer als Aussagen zum Niederschlag, Mittelwerte sicherer als Extremwerte und gebietsbezogene Angaben umso unsicherer, je kleinräumiger der lokale Bezug ist, d. h., je wahrscheinlicher eine Klimaentwicklung einen bestimmten Ort konkret betreffen kann, umso mehr ist man auf Wahrscheinlichkeitsangaben angewiesen. Entscheidungen müssen somit unter zum Teil erheblicher Unsicherheit getroffen werden.

4 Handlungsoptionen zum Umgang mit dem Klimawandel

Nach den vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnissen zum aktuellen Klimawandel und seinen anthropogenen Ursachen stellen heutige Entscheidungen und Handlungen die Weichen dafür, welche Zukunft die Menschheit zu erwarten hat. Zur Vermeidung katastrophaler Entwicklungen wird es für erforderlich gehalten, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, für verwundbare Regionen sogar möglichst unter 1,5 °C. Dies wurde auf der UN-Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 auch international verbindlich vereinbart (vgl. BMUB 2015). Die zur Umsetzung dieses Ziels notwendigen Handlungen sind dort allerdings weniger verbindlich festgelegt worden. Hinweise darauf finden sich bereits im IPCC-Bericht 2013 sowie in wissenschaftlichen Analysen des Paris-Abkommens, z. B. bei Edenhofer (2016). Die vereinbarte Obergrenze zur Begrenzung des Klimawandels erfordert den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger. Es ist unerlässlich, dass über 80 % der Kohlevorräte und der größte Teil der Öl- und Gasvorräte im Boden verbleiben. Zu diesem Zweck sind nicht nur entsprechende Maßnahmen zum Klimaschutz unumgänglich, sondern eine grundsätzliche gesellschaftliche Transformation und eine globale Wende hin zur *Nachhaltigkeit*, wie vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung angeregt (WBGU 2011). Nach Einschätzung des WBGU ist dies mithilfe eines radikalen Innovationspfads möglich, der alle Bereiche des industriellen Metabolismus erfassen muss. Das WBGU-Szenario auf der Basis aller erneuerbaren Energien (Sonne, Wind, Geothermie, Wasserkraft und Biomasse) mit baldigem Ausstieg aus den fossilen Energieträgern hat neben dem Ziel, die globale Erwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, den Charme eines substanziellen Anschubs für die Volkswirtschaft auf allen Ebenen. Zu diesem Innovationspfad gehören auch strategisch aufeinander und auf den Klimaschutz abgestimmte Anpassungsmaßnahmen. Eine aufeinander bezogene Strategie von Klimaschutz und Klimaanpassung ist auch als Handlungskonzept der *Raumordnung* erkannt worden (MKRO 2013). Diese Doppelstrategie haben Rahmstorf und Schellnhuber (2012) wie folgt umrissen:

Erforderlich ist

- 1) die Anpassung an den Klimawandel, um das Unvermeidbare zu beherrschen, und
- 2) eine Verminderung der Emissionen, um das Unbeherrschbare zu vermeiden.

Das Abkommen von Paris gibt Hoffnung, dass dieser Weg zur Begrenzung gefährlicher Auswirkungen des Klimawandels auch tatsächlich beschritten wird.

Literatur

- ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.) (2013): Glossar Klimawandel und Raumentwicklung (2. überarbeitete Fassung). Hannover. = E-Paper der ARL Nr. 10.
- Berger, A.; Loutre, M. F. (1991): Insolation values for the climate of the last 10 million years. In: Quaternary Science Reviews 10 (4), 297-317.
- Birkmann, J.; Vollmer, M.; Schanze, J. (Hrsg.). (2013): Raumentwicklung im Klimawandel: Herausforderungen für die räumliche Planung (Vol. 2). BoD – Books on Demand.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015): Übereinkommen von Paris. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf.
- Edenhofer, O. (2016): International Climate Policy after Paris: Challenges for a Treaty Design. 7 July 2016, Annual Meeting Alexander von Humboldt-Foundation, Berlin. https://www.pik-potsdam.de/members/edenh/talks/20160707_Edenhofer_AvH_final.pdf.
- Elderfield, H.; Ferretti, P.; Greaves, M.; Crowhurst, S.; McCave, I. N.; Hodell, D.; Piotrowski, A. M. (2012): Evolution of ocean temperature and ice volume through the Mid-Pleistocene climate transition. In: Science 337 (6095), 704-709.
- Ganopolski, A.; Calov, R. (2011): The role of orbital forcing, carbon dioxide and regolith in 100 kyr glacial cycles. In: Climate of the Past 7 (4), 1415-1425.
- Gerstengarbe, F. W.; Werner, P. (2007): Der rezente Klimawandel. In: Endlicher, W.; Gerstengarbe, F. W. (2007): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam, 34-43.
- Glaser, R. (2001): Klimageschichte Mitteleuropas: 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. Darmstadt.
- Herbert, T. D.; Peterson, L. C.; Lawrence, K. T.; Liu, Z. (2010). Tropical ocean temperatures over the past 3.5 million years. In: Science 328 (5985), 1530-1534.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (ed.) (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (ed.) (2014a): Climate Change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of working

- group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (ed.) (2014b): Climate Change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York.
- Jacob, D. (2012): Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung. Hamburg.
- Lisiecki, L. E.; Raymo, M. E. (2005): A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography* 20 (1), DOI: 10.1029/2004PA001071.
- Lüthi, D.; Le Floch, M.; Bereiter, B.; Blunier, T.; Barnola, J. M.; Siegenthaler, U.; Raynaud, D.; Jouzel, J.; Fischer, H.; Stocker, T. F. (2008): High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. In: *Nature* 453 (7193), 379–382.
- Masson-Delmotte, V.; Schulz, M.; Abe-Ouchi, A.; Beer, J.; Ganopolski, A.; González Rouco, J. F.; Jansen, E.; Lambeck, K.; Luterbacher, J.; Naish, T.; Osborn, T.; Otto-Bliesner, B.; Quinn, T.; Ramesh, R.; Rojas, M.; Shao, X.; Timmermann, A. (2013): Information from paleoclimate archives. In: Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P. M. (eds.): *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge / New York, NY, 383–464.
- Meinshausen, M.; Smith, S. J.; Calvin, K.; Daniel, J. S.; Kainuma, M. L. T.; Lamarque, J. F.; van Vuuren, D. P. P. (2011): The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. In: *Climatic Change* 109 (1-2), 213–241.
- MKRO – Ministerkonferenz für Raumordnung (Hrsg.) (2013): MKRO-Beschluss Raumordnung und Klimawandel. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StadtUndLand/LaendlicherRaum/mkro-handlungskonzept-klima.pdf?__blob=publicationFile (23.06.2015).
- Oerter, H. (2006): In der Antarktis dem Klima auf der Spur. EPICA Eiskerntiefbohrung an der Kohnen-Station. Bremerhaven.
- Pall, P.; Aina, T.; Stone, D. A.; Stott, P. A.; Nozawa, T.; Hilberts, A. G.; Lohmann, D.; Allen, M. R. (2011): Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470(7334), 382–385.
- Petoukhov, V.; Petri, S.; Rahmstorf, S.; Coumou, D.; Kornhuber, K.; Schellnhuber, H. J. (2016): Role of quasiresonant planetary wave dynamics in recent boreal spring-to-autumn extreme events. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*.
- PIK-Klimadaten (2016): Service zu Klima und Wetter Potsdam. <https://www.pik-potsdam.de/services/klima-wetter-potsdam/klimazeitreihen/lufttemperatur-mittel>.
- Pöschl, U.; Martin, S. T.; Sinha, B.; Chen, Q.; Gunthe, S. S.; Huffman, J. A.; Borrmann, S.; Farmer, D. K.; Garland, R. M.; Helas, G.; Jimenez, J. L.; King, S. M.; Manzi, A.; Milchailov, E.; Pauliquevis, T.; Petters, M. D.; Prenni, A. H.; Roldin, P.; Rose, D.; Schneider, J.; Su, H.; Zorn, S. R.; Artaxo, P.; Andreae, M. O. (2010): Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon. In: *Science* 329 (5998), 1513–1516.

- Rahmstorf, S. (1997): Risk of Sea-Change in the Atlantic. In: *Nature*, vol. 388, 825–826.
- Rahmstorf, S. (2002): Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. In: *Nature* 419, 207-214.
- Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H. J. (2012): *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*. München. = Beck'sche Reihe 2366.
- Rohling, E. J.; Braun, K.; Grant, K.; Kucera, M.; Roberts, A. P.; Siddall, M.; Trommer, G. (2010): Comparison between Holocene and Marine Isotope Stage-11 sea-level histories. In: *Earth and Planetary Science Letters* 291 (1), 97-105.
- Shakun, J. D.; Clark, P. U.; He, F.; Marcott, S. A.; Mix, A. C.; Liu, Z.; Otto-Bliesner, B.; Schmittner, A.; Bard, E. (2012): Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation. In: *Nature* 484 (7392), 49-54.
- Siegenthaler, U.; Stocker, T. F.; Monnin, E.; Lüthi, D.; Schwander, J.; Stauffer, B.; Raynaud, D.; Barnola, J.-M.; Fischer, H.; Masson-Delmotte, V.; Jouzel, J. (2005): Stable carbon cycle–climate relationship during the late Pleistocene. In: *Science* 310 (5752), 1313-1317.
- Stern, N. (2007). *The economics of climate change: the Stern report*. Cambridge, UK.
- Stock, M. (2013): *Der Klimawandel: Global und Regional in Europa und Deutschland*. In: Birkmann, J.; Vollmer, M.; Schanze, J. (Hrsg.): *Klimawandel und Raumentwicklung. Herausforderungen für die räumliche Planung*. Hannover, 14-43. = Forschungsbericht der ARL 2.
- Stock, M.; Walkenhorst, O. (2012): *Einführung: Klimawandel, Auswirkungen und Unsicherheiten*. In: Birkmann, J.; Schanze, J.; Müller, P.; Stock, M. (Hrsg.): *Anpassung an den Klimawandel durch räumliche Planung – Grundlagen, Strategien, Instrumente*. Hannover, 1-14. = E-Paper der ARL Nr. 13.
- Walkenhorst, O.; Stock, M. (2009): *Regionale Klimaszenarien für Deutschland. Eine Leseanleitung*. Hannover. = E-Paper der ARL Nr. 6.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung (Hrsg.) (2011): *Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*. Berlin.
- World Bank (ed.) (2012): *Turn down the heat – why a 4 °C warmer world must be avoided*. Washington.

Weiterführende Literatur

- Hupfer, P.; Kuttler, W.; Chmielewski, F. M. (Hrsg.) (2005): *Witterung und Klima: eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. Stuttgart.
- Latif, M. (2012): *Globale Erwärmung*. utb Profile, Band 3586.
- Oreskes, N.; Conway, E. M. (2014): *Die Machiavellis der Wissenschaft: Das Netzwerk des Leugnens*. Wiley-VCH; Übersetzung von: Oreskes, N., Conway, E. M. (2011). *Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming*. Bloomsbury Publishing USA.

Klima, Klimawandel

Papst Franziskus (2015): Laudato si'. Über die Sorge für das gemeinsame Haus: Die Umwelt-Enzyklika. Katholisches Bibelwerk.

Schellnhuber, H. J. (2015): Selbstverbrennung: Die fatale Dreiecksbeziehung zwischen Klima, Mensch und Kohlenstoff. Bertelsmann.

Bearbeitungsstand: 04/2018